

補助事業番号 2017M-152

補助事業名 平成29年度 プラズマアクチュエータの性能改善と車両の表面吹出しによる空力特性最適化 補助事業

補助事業者名 都城工業高等専門学校 機械工学科 白岩寛之研究室 准教授 白岩寛之

1 研究の概要

近年、抗力抑制のため効果的な取り組みである、輸送機器の表面形状の変更による空力特性の改善は行き詰まりを見せている。そこで、形状変更だけでは達成し得なかった空力特性の改善を、プラズマアクチュエータを用いることで達成する取り組みが注目されている。本研究では、プラズマアクチュエータの誘起流速を向上させるために、電極の形状や配置、誘電体テープの枚数、電圧や交流波形など様々な条件を変更して実験を行い、誘起流速の最大化に最適な仕様を検討する。これと並行して、プラズマアクチュエータを代表的な車体モデルに設置することを仮定した表面吹出しについて3次元数値流体力学解析により検討し、また同様の車体模型を用いて風洞実験を行い、数値解析結果との整合性を確認し、プラズマアクチュエータの設置の有無および設置位置の違いによる抗力抑制割合について検討する。

2 研究の目的と背景

現代社会では、車や飛行機などの輸送機器が必要不可欠となっている。これらは空気を押しつけて推進するため抗力が生じる。近年、抗力抑制のため効果的な取り組みとして、輸送機器の表面形状の変更による空力特性の改善が積極的に行われているが、形状変更だけでは達成し得なかった空力特性の改善に着目し、例えばプラズマアクチュエータを用いることで達成する取り組みが注目されつつある。具体的には、プラズマアクチュエータは輸送機器形状に関係なく空気の剥離を抑制できる可能性があるため、空力特性の制約を受けずに自由に表面形状を変更することができる。

本研究の目標は、輸送機器表面にプラズマアクチュエータの設置することによる空力特性改善の可能性を検討し、プラズマアクチュエータの有無による剥離抑制に対する最適な形状と設置位置を検証することである。

3 研究内容 (<https://researchmap.jp/read0137663>)

(1) プラズマアクチュエータの性能改善(電極間距離および誘電体厚さの検討)

製作したプラズマアクチュエータを図1に示す。上部電源(気流誘起側)には、長さ70mm(下部電極との重複部55mm)、幅10mm、厚さ105 μ mの銅箔テープ(銅箔厚さ35 μ m+粘着剤)を使用した。また、誘電体下側にも同様の銅箔テープを使用して下部電極(接地側)とした。誘電体には、厚さ90 μ mのPTFEテープを使用した。

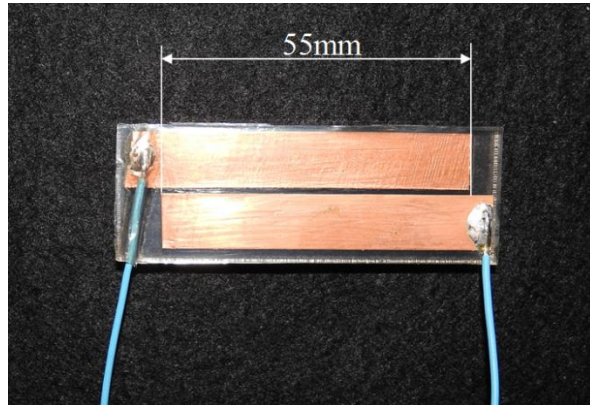


図 1 製作したプラズマアクチュエータ

図 2 に実験に使用した装置の全体図を図 3 に二次元ノズル外観を示す。高周波・高電圧の生成は、電圧、周波数を任意に設定できる高電圧高周波パルス電源（ケーアイテック、PSI-PG1040F）を使用した。電圧、周波数の波形測定には、オシロスコープ（BK PRECISION、2190E）を用い、回路に直列接続した抵抗器（ 1Ω ）を介して電流波形を計測した。また、プラズマアクチュエータより誘起される流速は、二次元ノズル出口部に熱線流速計（testo 425）を設置し測定した。なお、二次元ノズルは微小なプラズマアクチュエータにて誘起される流速を大きくし、熱線流速の測定精度を確保するためにプラズマアクチュエータ上面に設置し、ノズル入口断面（銅箔厚さ $35\mu\text{m}$ × 銅箔長さ 55mm ）と出口断面（ $5\text{mm} \times 2\text{mm}$ ）の間の連続の式よりプラズマアクチュエータにて誘起される管路入口流速を求めた。

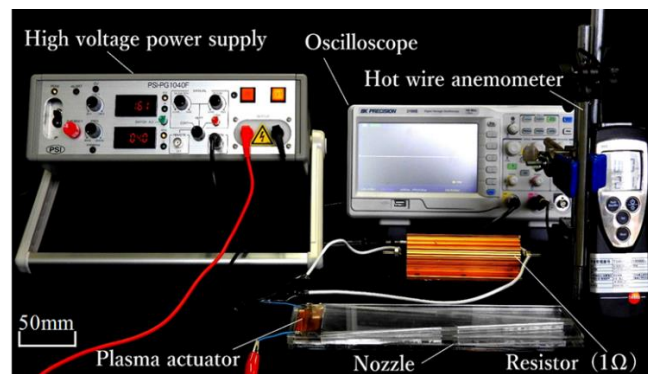


図 2 実験装置

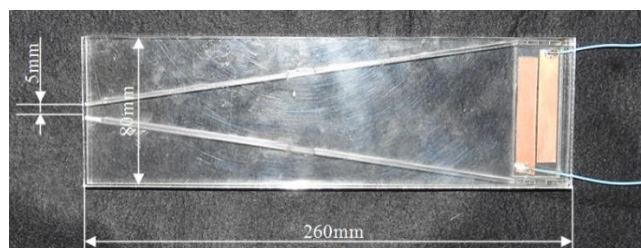


図 3 二次元ノズル

流速測定実験にあたり、電圧 E 、周波数 F 、電極間距離 L 、電極幅 ℓ 、誘電体厚さの指標として誘電体テープ枚数 N 、これら 5 つのパラメータを設定した。図 4 にプラズマアクチュエータにおける各パラメータの対応を示す。

なお、本研究ではまず電極間距離 L を決定した後、誘電体テープ枚数 N を決定するという手順で、段階的に複数回実験を行った。なお、各実験における流速測定実験は、誘電体テープが溶融し短絡するまで行った。詳細な実験条件については後述する。

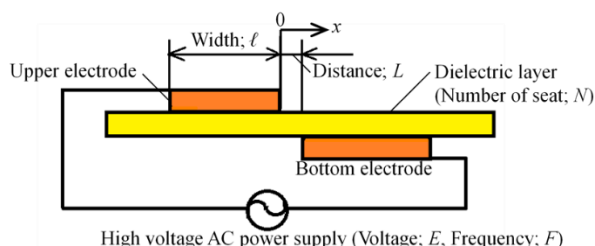


図 4 プラズマアクチュエータにおける各パラメータの対応

まず、誘電体テープ枚数 $N=3$ のもとの、電極間距離 L を決定するための流速測定実験を行う。表 1 に実験条件を示す。

表 1 実験条件 (電極間距離)

パラメータ	設定値
電圧 E [kV]	2~9 (1kV 毎に変更)
周波数 F [kHz]	10~40 (10kHz 毎に変更)
電極間距離 L [mm]	-3, -1, 0, 1, 3
電極幅 ℓ [mm]	10
誘電体テープ枚数 N [-]	3

図 5 には、電極間距離 $L=1\text{mm}$ における、誘起流速 v_1 と印加電圧 E の関係を示す。図 5 から、周波数 $F=20\text{kHz}$ において、誘起流速 v_1 は印加電圧 E の増加に対して比例的に増加している。また、周波数 $F=30\text{kHz}$ において、印加電圧 E の増加に対する誘起流速 v_1 の立ち上がりが早く、かつ安定した流速が得られていることがわかる。そして、周波数 $F=40\text{kHz}$ においては、誘起流速 v_1 は減少し、印加電圧 E の増加に対して概ね一定値を示していることがわかる。このことから、プラズマアクチュエータにおける最適な周波数 F は 30kHz 前後であると考えられる。ここで、各電極間距離 L において得られた誘起流速 v_1 の最大値を抜き出し、電極間距離 L との関係を図 6 に示す。図 6 から、電極間距離 $L=1\text{mm}$ において、誘起流速 v_1 の最大値が最も大きいことがわかる。これは、プラズマアクチュエータにおいて、電極間距離は近すぎても離れすぎても安定したプラズマを発生することができず、このように電極間距離が不適である場合には得られる流速の低下を招くのではないかと考えられ、電極間距離 L は 1mm 程度にするのが妥当であると考えられる。各電極間距離 L において最大流速を示す印加電圧は $E=6\sim 8\text{kV}$ 、周波数は $F=20\sim 30\text{kHz}$ であり、概ね近い値であるため、同条件下においても電極間距離 L は 1mm が最適であると考えられる。

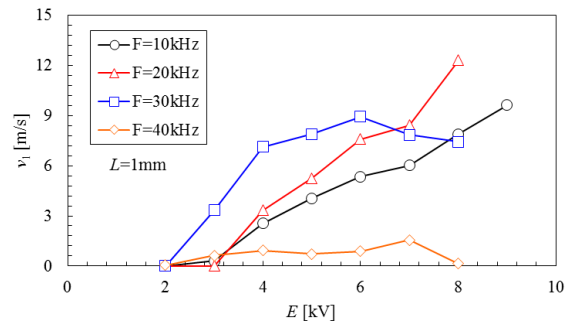


図 5 誘起流速 v_1 と印加電圧 E の関係 ($L=1\text{mm}$)

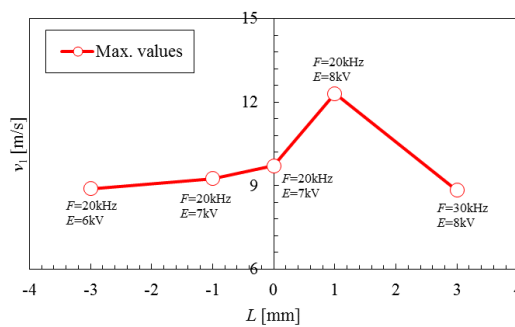


図 6 プラズマアクチュエータ流速の最大値と電極間距離の関係

続いて、決定した電極間距離 $L=1\text{mm}$ のもとで、誘電体テープ枚数 N を決定するための流速測定実験を行う。表 2 に実験条件を示す。

表 2 実験条件(誘電体テープ枚数)

パラメータ	設定値
電圧 E [kV]	2~9 (1kV 毎に変更)
周波数 F [kHz]	10~40 (10kHz 毎に変更)
電極間距離 L [mm]	1
電極幅 l [mm]	10
誘電体テープ枚数 N [-]	1、2、3、4、5

図 7 には、誘電体テープ枚数 $N=5$ における、誘起流速 v_1 と印加電圧 E の関係を示す。なお、図中の各プロットは、3 回の流速測定実験で得られた値の算術平均値であり、各プロットにおける最大値と最小値の範囲も図示している。図 7 から、電極距離 L の検討結果と同様に、 $F=20\text{kHz}$ において、誘起流速 v_1 は印加電圧 E の増加に対して比例的に増加するといった傾向や、周波数 $F=30\text{kHz}$ において、印加電圧 E の増加に対する誘起流速 v_1 の立ち上がりが早く、かつ安定した流速が得られるといった傾向が得られた。また、周波数 $F=40\text{kHz}$ において、誘起流速 v_1 は減少し、印加電圧 E の増加に対して概ね一定値を示すといった傾向も同様である。この原因の考察については後述する。ここで、各誘電体テープ枚数 N において得られた誘起流速 v_1 の最大値を抜き出し、

誘電体テープ枚数 N との関係を図 8 に示す。図 8 から、誘起流速 v_1 の最大値は誘電体テープ枚数 N の増加に対して比例的に増加し、誘電体テープ枚数 $N=5$ において、誘起流速 v_1 の最大値が最も大きいことがわかる。これは、誘電体テープ枚数 N が増加することにより、見かけの誘電率が低下することや高周波・高圧の電流に耐えることが可能であること等が要因であると考えられる。また、誘電体テープ枚数 N を極端に大きくした場合として、誘電体テープ枚数 $N=10$ の流速測定実験も行ったが、誘起流速 v_1 の最大値は誘電体テープ枚数 $N=5$ のプラズマアクチュエータより小さく、また印加電圧 $E=7\text{kV}$ 以上の条件ではプラズマが発生せず、気流も誘起されなかった。このことから、誘電体テープ枚数 $N=5$ と $N=10$ の間に誘電体テープ枚数 N の最適値があると考えられる。

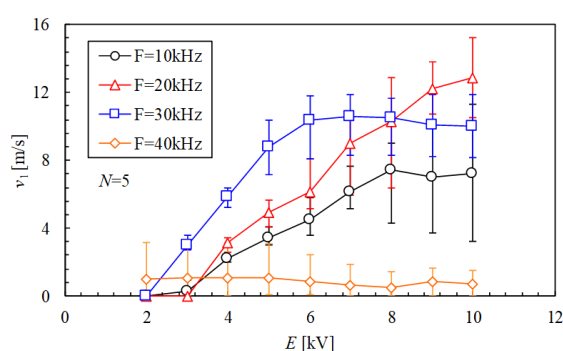


図 7 誘起流速 v_1 と印加電圧 E の関係 ($N=5$)

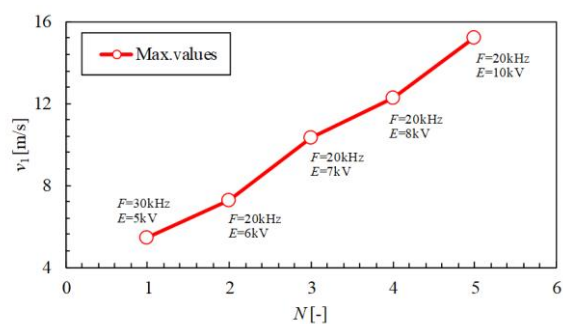


図 8 各誘電体テープ枚数 N における誘起流速 v_1 の最大値

さて、周波数 $F=40\text{kHz}$ において、誘起流速 v_1 は減少する原因について考察する。本研究に際し調査した論文では、高周波・高電圧の交流を印加すると、プラズマアクチュエータから誘起される気流が逆流すると述べられていた。このため、本研究で行った流速測定実験においても、周波数 $F=40\text{kHz}$ の条件下で気流の逆流が発生している可能性があると考えた。そこで、プラズマアクチュエータ周りの気流を可視化する手段として、粒子画像流速測定法(プラズマアクチュエータ Particle Image Velocimetry、以下、PIV)を用いた。図 9、11 には、PIV で得られた速度ベクトルの分布を示す。図 9 は周波数 $F=30\text{kHz}$ (印加電圧 $E=5\text{kV}$ 、電極間距離 $L=1\text{mm}$ 、誘電体テープ枚数 $N=5$)、図 10 は周波数 $F=40\text{kHz}$ (印加電圧 $E=5\text{kV}$ 、電極間距離 $L=1\text{mm}$ 、誘電体テープ枚数 $N=5$) の結果である。図 9、11 から、周波数 $F=30\text{kHz}$ においては、プラズマアクチュエータの電極間(プラズマ発

生部)に上方から下方に引き込まれる気流、およびプラズマアクチュエータによる気流発生方向の気流のみが発生しているが、周波数 $F=40\text{kHz}$ においては、プラズマアクチュエータによる気流発生方向とは逆向きの流れが発生していることがわかる。これが $F=40\text{kHz}$ で誘起流速 v_1 が減少する一因であると考えられる。

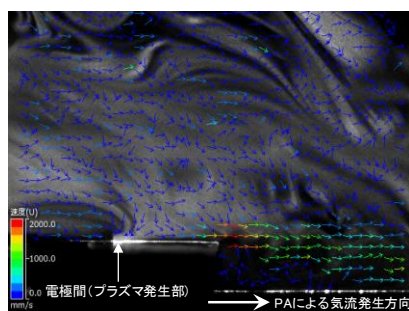


図 9 $F=30\text{kHz}$ における速度ベクトルの分布

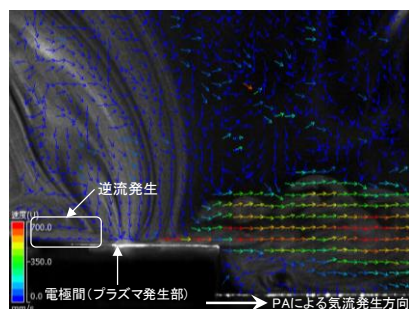


図 10 $F=40\text{kHz}$ における速度ベクトルの分布

(2) プラズマアクチュエータの性能改善(電極幅および電極厚さ、複雑電極形状の検討)

図 11 に実験に使用した装置の全体図を示す。高周波・高電圧交流の生成には、電圧、周波数を任意に設定できる高電圧高周波パルス電源(ケーアイテック、PSI-PG1040F)を使用し、プラズマアクチュエータから誘起された流速は、流速測定洞に設置した熱線流速計(エムケー・サンティフィック、DT-8880)を使用し測定した。製作者の技量に依らないプラズマアクチュエータの製作方法として基板製作法に着目し、トナー熱転写法によりプラズマアクチュエータを製作した。

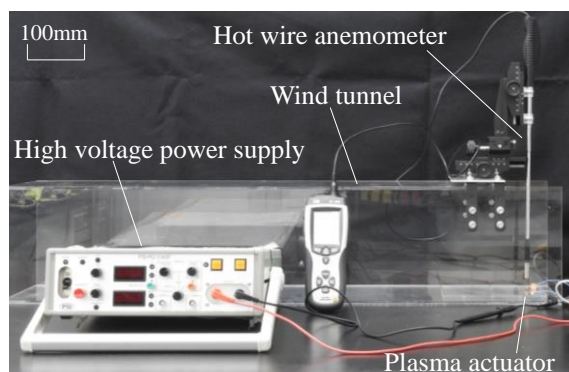


図 11 実験装置

電極幅および電極厚さに関する流速測定実験にあたり、電圧 E 、周波数 F 、電極間距離 L 、電極幅 ℓ 、電極厚さ t 、誘電体厚さ a をパラメータとして設定した。図 12 にプラズマアクチュエータにおける各パラメータの対応を示す。また、表 3 に実験条件を示す。実験にあたり、1年目(昨年度)の流速測定実験の最適値を参考にして、電極間距離 $L=1\text{mm}$ 、誘電体 $a=0.381\text{mm}$ 、電極長さ $b=55\text{mm}$ とした。また、誘起流速の値が優れていた周波数 $F=20\text{kHz}$ を使用し、予備実験により、プラズマアクチュエータへの熱的負担が少なくプラズマの発生する電圧 $E=5\text{kV}$ を印加した。なお、測定原点は、プラズマと熱線流速計が干渉しないよう上部電極から流れ方向に 3mm 、プラズマアクチュエータ表面から高さ方向に 2mm の位置に設定した。また、 y 軸方向に -20mm 、 0mm 、 20mm 、 z 軸方向に 0mm 、 1mm 、 2mm の計 9 点においてそれぞれ 3 回の流速測定実験を行い、90 秒間の測定値の算術平均値を実験値として用いた。

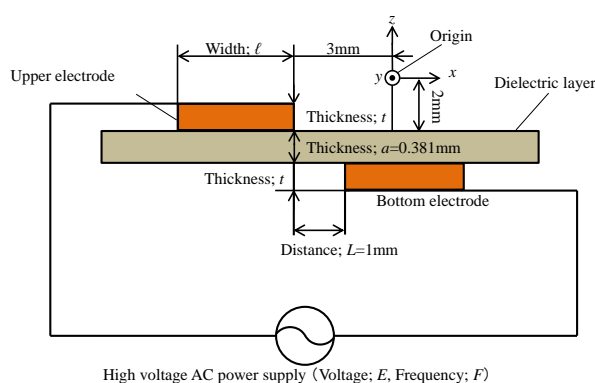


図 12 プラズマアクチュエータにおける各パラメータの対応

表 3 実験条件

パラメータ	設定値
電圧 E [kV]	5
周波数 F [kHz]	20
電極間距離 L [mm]	1
電極長さ b [mm]	55
誘電体厚さ a [mm]	0.381
電極幅 ℓ [mm]	5、10、15
電極厚さ t [μm]	18、35、70

図 13～図 15 に、各電極厚さ t における誘起流速 u と y 軸方向の距離 ($x=0\text{mm}$ 、 $z=0\text{mm}$) の関係を示す。図 13 から、電極厚さ $t=18\mu\text{m}$ においては、電極幅 $\ell=5\text{mm}$ の場合に概ね最も大きな誘起流速 u の値を示し、電極幅 $\ell=10\text{mm}$ の場合に最も小さな誘起流速 u の値を示していることがわかる。一方、図 14、15 の電極厚さ $t=35\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ においては、いずれの電極幅 ℓ においても誘起流速 u に有意な差は見られないことがわかる。

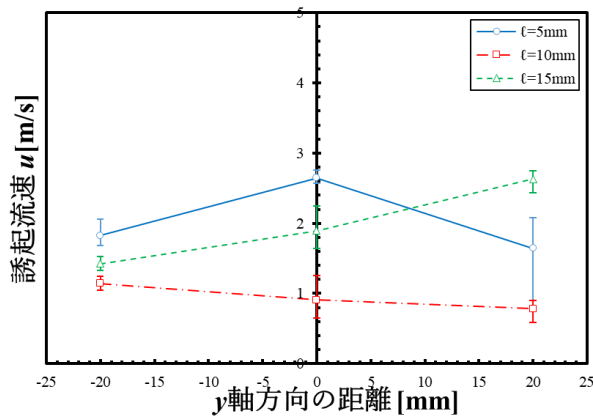


図 13 電極厚さ $t=18\ \mu\text{m}$ における y 軸方向の誘起流速 u の分布

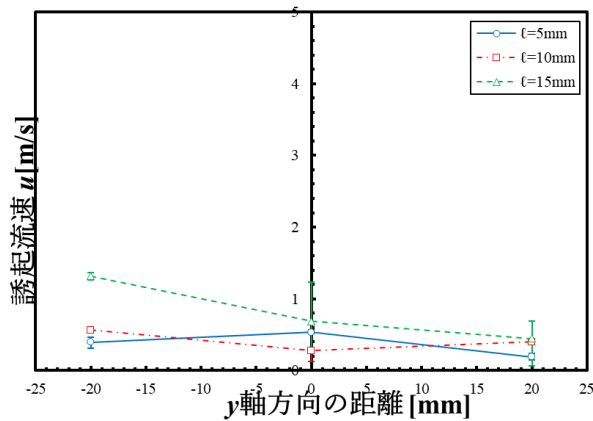


図 14 電極厚さ $t=35\ \mu\text{m}$ における y 軸方向の誘起流速 u の分布

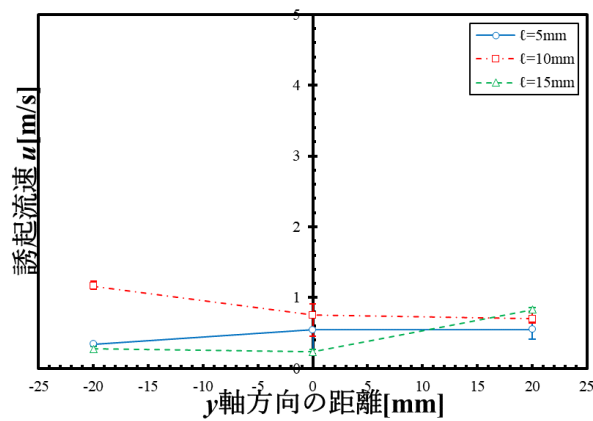


図 15 電極厚さ $t=70\ \mu\text{m}$ における y 軸方向の誘起流速 u の分布

図 16 に、 y 軸方向に平均した誘起流速 u と電極幅 l の関係を示す。図 16 から、電極厚さ $t=18\ \mu\text{m}$ 、 $70\ \mu\text{m}$ においては、電極幅 l が変化することによる誘起流速 u の傾向に有意な差は見られないことから、電極幅 l がプラズマアクチュエータの性能に及ぼす影響は小さいといえる。しかし、電極厚さ $t=18\ \mu\text{m}$ においては、電極幅 $l=10\text{mm}$ の場合に誘起流速が下に凸になる傾向が

見られる。そのため、電極幅 $\ell=5\text{mm}$ 未満や $\ell=15\text{mm}$ を上回る場合の誘起流速 u を測定し、最適な電極幅 ℓ を検討することが望まれる。

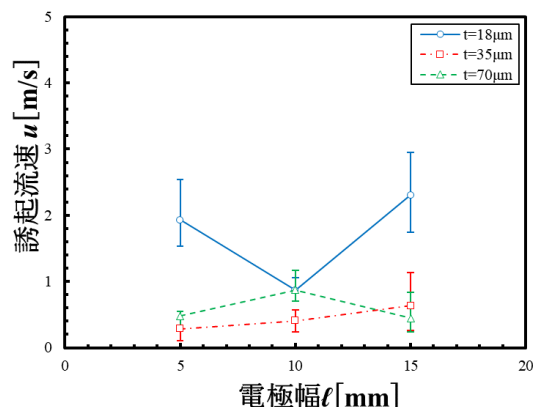


図 16 誘起流速 u (y 軸方向の平均値) と電極幅 ℓ の関係

図 17 に、 y 軸方向に平均した誘起流速 u と電極厚さ t の関係を示す。図 17 から、いずれの電極幅 ℓ においても、電極厚さ $t=18\mu\text{m}$ の場合の誘起流速 u が最も大きい値を示すことがわかる。

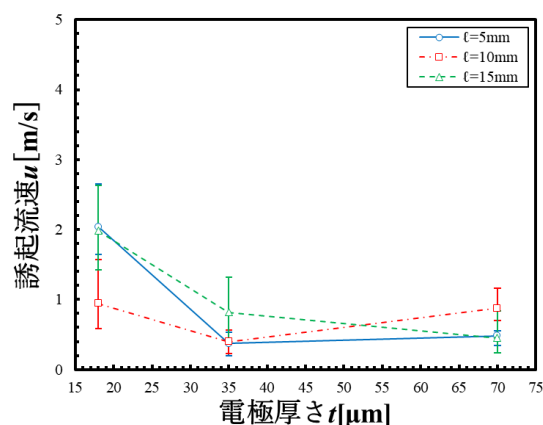


図 17 誘起流速 u (y 軸方向の平均値) と電極厚さ t の関係

以上から、本実験範囲において、誘起流速 u への電極幅 b の影響は小さくことがわかり、電極厚さ $t=18\mu\text{m}$ が最適であると考えられる。

複雑電極形状(鋸歯状の一山)の流速測定実験にあたり、電圧 E 、周波数 F 、電極間距離 L 、電極厚さ t 、誘電体厚さ a 、電極部角度 θ 、電極厚さ t 、誘起流速 u をパラメータとして設定した。表 4 に実験条件を示す。また、図 18 にプラズマアクチュエータにおける各パラメータの対応を示す。実験にあたり、電極厚さ $t=18\mu\text{m}$ を使用する。電極部角度 $\theta = 60^\circ$ 、 90° 、 120° のプラズマアクチュエータを製作し、同条件下で流速測定実験を行った。この際、電極の谷部において、電極間距離 $L=1\text{mm}$ を保つために谷部を $R1$ にした。なお、図 18 にプラズマアクチュエータの測定原点を示し、対応する測定点を表 5 に示す。測定原点は、プラズマと熱線流速計が干渉しないよう上部電極から流れ方向に 3mm 、プラズマアクチュエータ表面から高さ方向に 2mm に設定した。実験は y

軸方向に-3mm、0mm、3mm、x 軸方向に 3mm、6mm、9mm の計 8 点においてそれぞれ 3 回の流速測定実験を行い、90 秒間の測定値の算術平均値を実験値として用いた。なお、x=0mm、y=±3mm においては、プラズマと熱線流速計の干渉が懸念されたことから、流速測定点から除外した。

表 4 実験条件

パラメータ	設定値
電圧 E [kV]	5
周波数 F [kHz]	20
電極間距離 L[mm]	1
誘電体厚さ a [mm]	0.381
電極部角度 θ [°]	60、90、120
電極厚さ t [μ m]	18

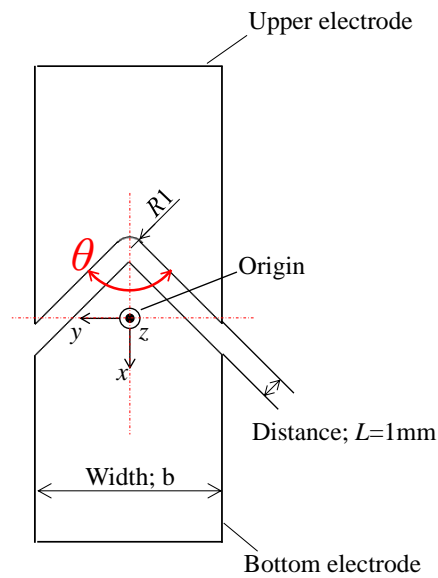


図 18 複雑電極形状のプラズマアクチュエータの概要

表 5 複雑電極形状のプラズマアクチュエータの測定点

y [mm] \ x [mm]	-3	0	3
0	×	○	×
3	○	○	○
6	○	○	○
9	×	○	×

○:測定点 ×:測定除外点

図 19～図 21 に、各電極部角度 θ における誘起流速 u と x 軸方向の距離 ($z=0\text{mm}$) の関係を示す。図 19～図 21 から、いずれの電極部角度 θ においても $y=0\text{mm}$ の場合に最も大きな誘起流速 u の値を示していることがわかる。このことから、電極に角度を付けることにより、流れ方向の中心軸に誘起流が収約し、誘起流速 u が大きくなると考えられる。

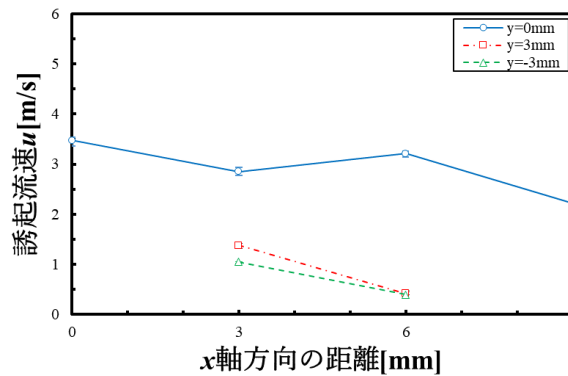


図 19 電極部角度 $\theta = 60^\circ$ における誘起流速 u の分布

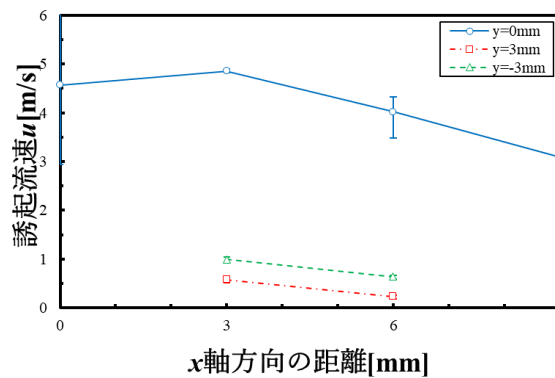


図 20 電極部角度 $\theta = 90^\circ$ における誘起流速 u の分布

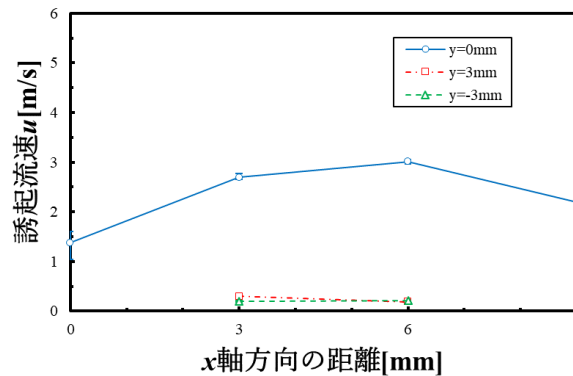


図 21 電極部角度 $\theta = 120^\circ$ における誘起流速 u の分布

図 23 車体モデル内部図面

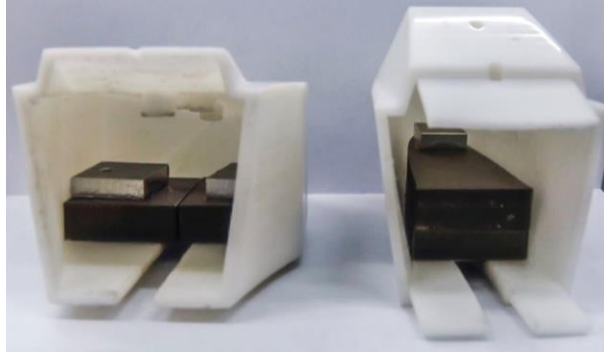


図 24 車体モデル内部完成図

車体モデルは、高さ調節用段付き丸棒に図 23 に示す車体モデル固定用平板をボルトにより設置したため、車体モデルタイヤ部はボルトとナットを用いて固定される。治具に車体モデルを設置した写真を図 25 に示す。

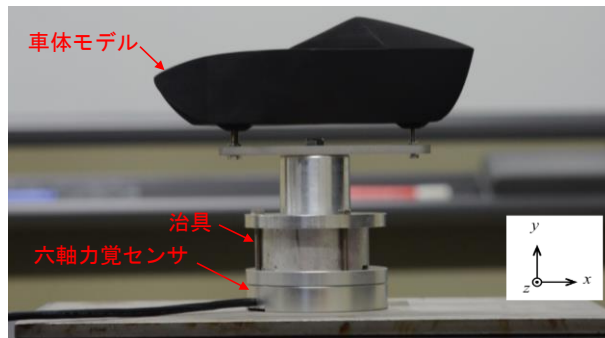


図 25 車体モデル設置完成図

測定部の風速を 6m/s から 18m/s まで 2m/s 刻みで変化させ実験を行った。データ取得は 1 回 50 秒 60000Step を、1 条件につき 3 回行った。なお、測定部風速は風洞実験装置測定部上流側に熱線風速計を設置し、1 条件につき計 9 回の計測を行い、その平均値を実験時の風速とした。実験の様子を図 26 に示す。

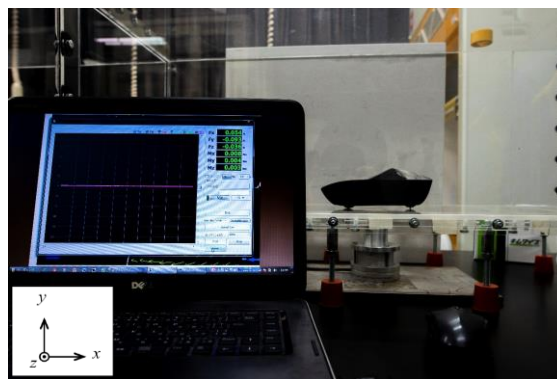


図 26 車体モデルによる抗力測定実験 実験風景

車体に生じる流体抗力と揚力の測定結果をそれぞれ図 27 および図 28 に示す。図 27 の縦軸には抗力を、図 28 の縦軸には揚力を取り、横軸に Re 数を取り整理を行った。Re 数については次式で与えられる。

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ は流体の密度、 U は断面平均流速、 μ は流体の粘性係数、 L は車体の代表長さを示す。代表長さ L には、車体の全長 180mm を用いた。図 27 および図 28 には、昨年度行った流速 6～10m/s の CFD 解析結果の最大値、最小値、平均値と、6～18m/s の六軸力覚センサを用いた流体力測定結果を示す。図 27 に示す抗力については Re 数が大きくなるに伴い大きくなる。六軸力覚センサによる流体抗力測定値に関しては CFD 解析結果とよく一致しており、CFD 解析結果より得られた平均値からの不確かさは±10%である。したがって、CFD 解析により実際の流れ場を予測できる。図 28 に示す揚力については、すべての測定値が 0.02N 未満となるため、抗力が最も支配的である。したがって、PA の設置により抗力を低減することで空力特性の改善が見込まれる。

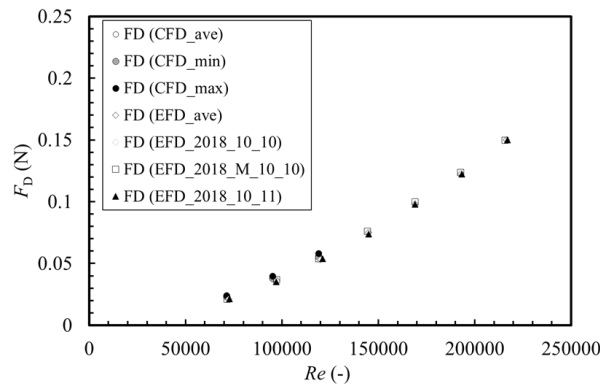


図 27 車体に生じる流体抗力の測定結果

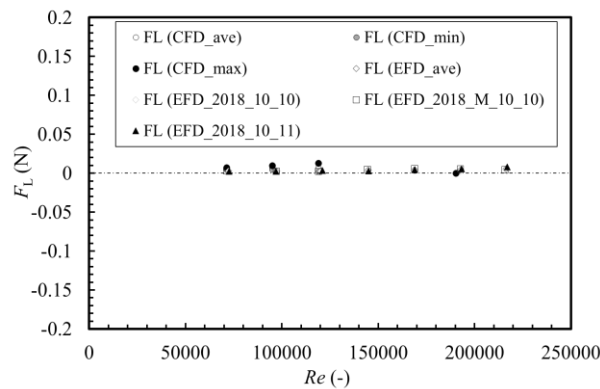


図 28 車体に生じる揚力の測定結果

本研究では、輸送用車両車体モデルまわりの流れ場を測定することを目的として、PIV を用いた。煙発生装置(Dainichi、PS-2006)を風洞装置の空気流入口に設置し、可視化粒子を空気と同時に風洞内に流入させた。高速度カメラ(Photoron、FASTCAM Mini AX50)は透明アクリル製風洞実験装置の外部側方に設置し、車体モデル天頂部近傍の流れ場を撮影した。また、風洞実験装置出口にレーザー照射器(カトウ光研、PIV Laser G1000)を設置し、下流側から車体モデル天頂部にレーザーシートの照射を行った。機材を設置した実験の様子を図 29 に示す。なお、本実験では測定部の風速 6m/s の条件下で測定を行った。この場合の Re 数は 7.1×10^4 である。

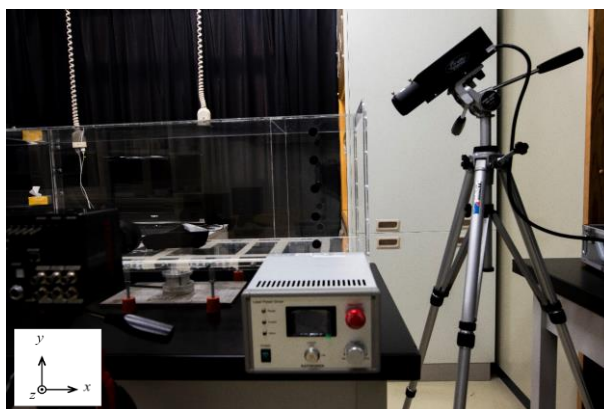


図 29 PIV による車体モデルまわりの流れ場の可視化測定

PIV による輸送用車両車体モデルまわりの流れ場の可視化測定結果を図 30 に示す。車体モデル天頂部よりも下流側ではく離渦が発生しており、発生後は成長、離脱を繰返し、離脱後は再付着することなく成長しながら後方へ移動する。すなわち、車体モデル下流側で発生するはく離渦に伴う圧力低下により圧力抗力が生じている可能性が示唆される。

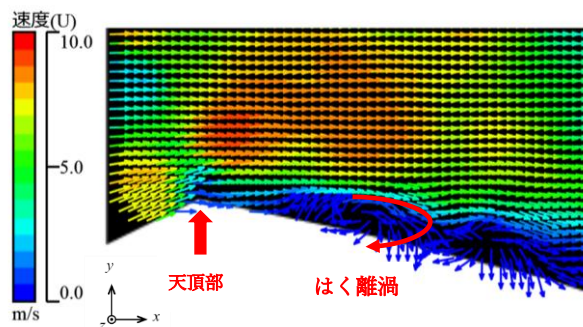


図 30 PIV による車体モデルまわりの流れ場測定結果

本研究では、輸送用車両車体モデルに設置するPAの最適な設置位置を検討することを目的として、PA を車体上面の異なる位置に設置し、流体抗力の測定を行った。設置位置に関しては図 31(a)に示す車体天頂部(Type A)と、図 31(b)に示す車体天頂部後方(Type B)の2通りとした。PA の印加電圧は 7kV とし、周波数を 20kHz とした。ただし、PA を車体モデル表面に設置することで車体モデルまわりの流れ場が変化し、流体抗力に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、PA

を稼働しない条件下において車体モデルの流体力も同時に計測した。測定部の風速は6m/sであり、この場合の Re 数は 7.1×10^4 である。

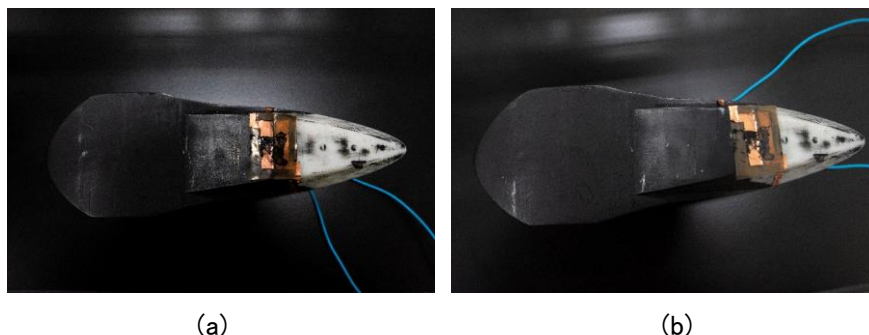


図 31 PA を車体モデル上面に設置した様子

表 6 に、車体モデルの流体力測定結果を示す。PA は車体表面で x 軸正方向向きの流れを誘起するため、PA を稼働すると車体モデルの推進力(-x 方向)として測定される。この力を PA による抗力抑制による測定値の低下と区別して検討するために、風速 0m/s の条件下において PA を稼働した場合の六軸力覚センサ x 軸方向の推進力を測定し、補正值として、6m/s の条件下での測定値との差を抗力抑制効果とした。抗力抑制効果は次式で与えられる。

$$\text{抗力抑制効果}[\%] = \frac{F_1[\text{N}] - F_4[\text{N}]}{F_4[\text{N}]} \times 100 \quad \dots \quad (2)$$

表 6 車体モデルの流体力測定結果

測定部風速	天頂部 [N]	天頂部下流側 [N]
6m/s (PA非稼働)	$F_{1_A}=0.0222$	$F_{1_B}=0.0237$
0m/s (PA稼働)	$F_{2_A}=-0.0012$	$F_{2_B}=-0.0026$
6m/s (PA稼働)	$F_{3_A}=0.0179$	$F_{3_B}=0.0192$
補正後測定値	$F_{4_A}=0.0191$	$F_{4_B}=0.0218$
抗力抑制効果	14%	8%

輸送用車両車体モデルの天頂部 (Type A) と天頂部下流側 (Type B) に PA を設置した 2 通りの条件下において輸送用車両車体モデルにはたらく流体力の測定を行った。それぞれの条件下での実験結果を比較すると、車体モデルの抗力抑制効果に違いがみられた。具体的には、図 32(a) 中に示すように Type A では約 14% の抑制効果が得られ、一方で Type B の場合には図 32(b) 中に示すように約 8% の抑制効果が得られた。いずれも抗力抑制の効果は見られるものの、特に PA を天頂部に設置した場合はより効果的な抗力抑制につながることを明らかにした。ただし、今回行った測定部風速 0m/s (PA 稼働) の条件下における推進力 F_2 はすべて 0.03N 未満となった。したがって、六軸力覚センサ分解能 (0.05N) よりも小さいため、測定値の正しさを補償することはできない。本研究では、推進力に関わる繰返試験と再現性試験を行ったが、今後はより正確に測定する方法を検討すべきである。

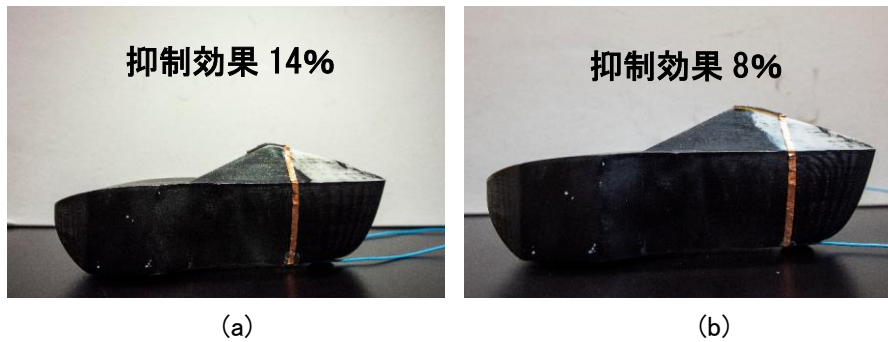


図 32 PA を車体モデルに設置した場合の抗力抑制効果

車体モデル天頂部と天頂部下流側の 2 ヶ所に PA を設置し、PIV による輸送用車両車体まわりの流れ場の可視化測定を行い、それぞれの測定結果を比較した。PA の印加電圧は 7kV とし、周波数は 20kHz とした。輸送用車両車体モデル天頂部に PA を設置した車体モデル (Type A) の流れ場測定結果を図 33 に示し、天頂部下流側に PA を設置した車体モデル (Type B) の流れ場測定結果を図 34 に示す。図 33 および図 34 より、PA を設置していない条件下で得られた可視化結果 (図 30) と比較した場合、はく離渦が PA によって抑制され、天頂部より下流側で渦が発生していないことがわかる。また、天頂部下流側生じる流速は小さくなり、結果として車体モデル天頂部後方の圧力低下が抑制されていることがわかる。前述した PA を設置した条件下での車体モデルにはたらく流体力測定結果と比較すると、Type A、Type B いずれの設置位置の条件下においても流体抗力が抑制されることから、はく離渦の抑制により空力特性が改善されることは明らかである。それぞれの設置位置での PIV による流れ場の可視化測定結果を比較すると、天頂部下流側の流れ場は異なる傾向を示す。すなわち、Type B の場合には、天頂部ではく離渦が発生しているが、PA を設置していない条件に比べて渦の発達を抑えることで圧力低下を抑制していると考えられる。一方、Type A の場合は、天頂部ではく離渦は発生せず、PA が誘起する流速により流れは後方下向きに移動し、圧力低下を抑制している。したがって、Type A の場合は Type B に比べてより大きな抗力抑制効果を示すといえる。

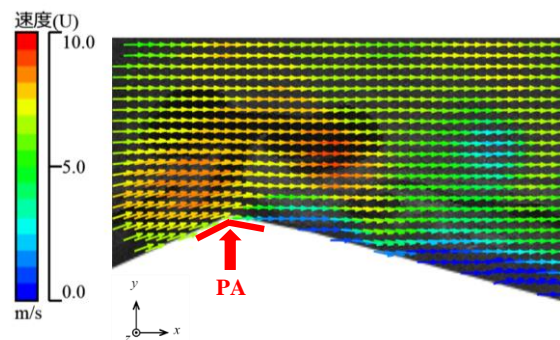


図 33 車体モデル天頂部に PA を設置した場合 (Type A)

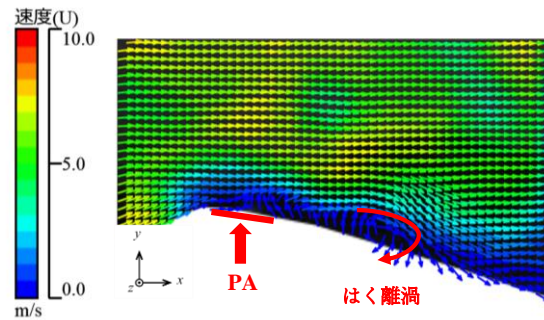


図 34 車体モデル天頂部後方に PA を設置した場合 (Type B)

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本研究において、プラズマアクチュエータの性能改善に関しては、電極間距離、誘電体厚さ、電極幅および電極厚さを変えて流速測定実験を行い、さらに鋸歯状の一山を抽出した複雑電極形状のプラズマアクチュエータについて流速測定実験を行って検討した結果、本実験範囲における最適電極形状が明らかになった。また、車両の表面吹出しによる空力特性最適化に関しては、実際の車体模型にプラズマアクチュエータを設置して風洞実験を行い、六軸力覚センサによる抗力測定により、プラズマアクチュエータを設置することにより車体模型の抗力抑制に効果があることがわかり、設置していない場合との比較において、車体天頂部 (Type A) への設置では約14%、車体天頂部後方 (Type B) への設置では約8%の抗力抑制効果を得られることがわかり、PIV計測による可視化によりそのメカニズムの一端を明らかにした。これらの成果について、学会発表等を通して積極的に情報発信を行ったことにより、プラズマアクチュエータの応用に関連する分野の研究の進展に寄与することが期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者は、熱工学、伝熱工学、熱流体工学に関連した教育・研究活動を行っており、特に最近では、スターリング冷凍機、サーモサイフォン (特に凝縮熱伝達)、流下液膜式熱交換器、プラズマアクチュエータ等に関する研究を行っている。本事業で行ったプラズマアクチュエータによる輸送機器表面の剥離抑制に関する研究は、研究代表者が対象とする研究領域において、主要テーマの一つとして位置付けており、引き続きプラズマアクチュエータの性能改善やいずれの車両にも当てはまるプラズマアクチュエータの最適な表面吹出し位置に関する普遍的な法則性について検討を行っていく予定である。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (1) 青井航, 重永凱也, 輸送機器に設置するプラズマアクチュエータの最適化に関する研究, 平成29年度都城工業高等専門学校卒業論文, (2018.1.26), pp.1-31.
- (2) 下西凜, 竹之下春樹, 輸送機器の空力特性に係る可視化風洞実験装置の精度評価と車体まわりの可視化計測, 平成29年度都城工業高等専門学校卒業論文, (2018.1.26),

pp.1-36.

- (3) 佐多勇亮, 川瀬倫太郎, 下西凜, 竹之下春樹, 藤川俊秀, 白岩寛之, 計算流体力学解析による輸送機器まわりの流れ場解析, 日本機械学会九州支部宮崎地区第10回学生研究発表会講演論文集, (2018.3.8), 講演番号106.
- (4) 青井航, 重永凱也, 白岩寛之, 藤川俊秀, 輸送機器に設置するプラズマアクチュエータの最適化に関する研究, 日本機械学会九州支部宮崎地区第10回学生研究発表会講演論文集, (2018.3.8), 講演番号207.
- (5) 柳田佳樹, 奥村圭介, 藤川俊秀, 白岩寛之, PIV計測とCFD解析による輸送用車両車体まわりの流れ場の可視化, 日本実験力学学会講演論文集(2018年度年次講演会), 18 (2018.8.24), pp.87-88.
- (6) Nagaoka, K., Nukumizu, Y., Shiraiwa, H., Fujikawa, T. and Higashi, T., Optimization of Plasma Actuator Installed in Transportation Equipment, Proc. of the 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, (2018.8.29), S06.
- (7) 長岡虎士朗, 温水佑紀, プラズマアクチュエータの熱流動特性に及ぼす電極形状の影響, 平成30年度都城工業高等専門学校卒業論文, (2019.1.31), pp.1-46.
- (8) 前田康貴, 近藤芳崇, プラズマアクチュエータによる輸送用車両車体に生じるはく離渦の抑制, 平成30年度都城工業高等専門学校卒業論文, (2019.1.31), pp.1-38.
- (9) 田中凱人, 輸送用車両車体の空力抵抗に影響を及ぼす車体まわりの流れ場の解析, 平成30年度都城工業高等専門学校卒業論文, (2019.1.31), pp.1-29.
- (10) 温水佑紀, 長岡虎士朗, 白岩寛之, プラズマアクチュエータの熱流動特性に及ぼす電極形状の影響, 日本機械学会九州支部宮崎地区第11回学生研究発表会講演論文集, (2019.3.8), 講演番号103.
- (11) 藤川俊秀, 白岩寛之, 柳田佳輝, 東利樹, 松岡常吉, 中村祐二, 江頭竜, 模型実験による競技用車両車体に働く抗力の測定と流れ場の可視化, 実験力学へ投稿中.

7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの
該当なし
- (2) (1)以外で当事業において作成したもの
該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 都城工業高等専門学校(ミヤコノジョウコウギョウコウトウセンモンガッコウ)

住 所： 〒885-8567

宮崎県都城市吉尾町473番の1

担 当 者： 准教授 白岩寛之(ジュンキョウジュ シライワヒロユキ)

担 当 部 署： 機械工学科(キカイコウガッカ)

E - m a i l: shiraiwa@cc.miyakonojo-nct.ac.jp

U R L: <https://www.miyakonojo-nct.ac.jp/>